

## 工艺参数对高强度铝合金挂板力学性能的影响

朱登杰<sup>1</sup>, 边美华<sup>2</sup>, 张志强<sup>1</sup>, 李君华<sup>2</sup>, 黄增浩<sup>1</sup>, 彭家宁<sup>2</sup>

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510000; 2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 针对现有铝合金材料和铸铁材料的不足之处, 利用颗粒增强技术设计了一种高强度6XXX系铝合金材料, 通过正交试验研究了高强度铝合金挂板锻造过程中打击能量、固溶温度和时效温度3项工艺参数对高强度铝合金挂板力学性能的影响规律, 并通过抗拉强度和拉断力两个指标进行极差分析。结果表明, 固溶温度和时效温度对力学性能的影响程度要远大于打击能量。对于拉断力的最佳工艺参数为: 打击能量为20 kJ、固溶温度为535 ℃、时效温度为165 ℃; 对于抗拉强度的最佳参数为: 打击能量为25 kJ、固溶温度为545 ℃、时效温度为175 ℃。随着固溶温度的提高, 高强度铝合金挂板的抗拉强度大幅增大, 拉断力先显著提高后变化不明显; 随着时效温度的提高, 高强度铝合金挂板的拉断力及抗拉强度均有所下降。

**关键词:** 颗粒增强; 高强度铝合金; 锻造工艺; 打击能量; 固溶温度; 时效温度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.003

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 12-0020-07

## Influence of process parameters on mechanical performance for high-strength aluminum alloy panel

Zhu Dengjie<sup>1</sup>, Bian Meihua<sup>2</sup>, Zhang Zhiqiang<sup>1</sup>, Li Junhua<sup>2</sup>, Huang Zenghao<sup>1</sup>, Peng Jianing<sup>2</sup>

(1. Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. Electric Power Science Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of existing aluminum alloy materials and cast iron materials, a high-strength 6-series aluminum alloy material was designed by using particle reinforcement technology. Then, through orthogonal experiment, the influence laws of three process parameters, namely, impact energy, solution temperature and aging temperature, on the mechanical properties of high-strength aluminum alloy panel during forging process were studied, and the range analysis was conducted by two indicators of tensile strength and tensile breaking force. The results show that the influence degrees of solution temperature and aging temperature on the mechanical properties are much greater than that of impact energy. The optimal process parameters for tensile breaking force are the impact energy of 20 kJ, the solution temperature of 535 ℃, and the aging temperature of 165 ℃. The optimal parameters for tensile strength are the impact energy of 25 kJ, the solid solution temperature of 545 ℃, and the aging temperature of 175 ℃. With the increasing of solid solution temperature, the tensile strength of high-strength aluminum alloy panel increases significantly, and the tensile breaking force first increases significantly and then changes insignificantly. As the aging temperature increases, the tensile breaking force and tensile strength of high-strength aluminum alloy panel both decrease.

**Key words:** particle reinforcement; high-strength aluminum alloy; forging process; impact energy; solution temperature; aging temperature

电力金具是电力系统中用于连接、固定和支持电力设备的重要组成部分, 是输电线路工程中的重要组成部分<sup>[1]</sup>。PD挂板(单板平行挂板)属于连接金具, 用于金具之间的连接, 起到承载的作用。PD挂板的抗拉强度及拉断力影响着输电线路的安全运行<sup>[2-3]</sup>, 由于传统铝合金金具采用铸造方式加工生产, 其力学性能普遍较低, 现有商用超高强度铝合

金的腐蚀性能较差, 易形成剥层腐蚀。现阶段PD挂板普遍采用铸铁材料, 铸铁金具需进行表面镀锌处理且铸铁连接金具在运行过程中存在损耗。铸造与镀锌均为高能耗产业, 与国家“双碳”战略目标相违背, 因此, 研制一种高强度、耐腐蚀铝合金金具的重要性逐渐凸显出来。

文献[4]~文献[7]显示了预时效温度对铝合金的时效稳定性影响显著, 且热处理可以有效调控高强度铝合金的微观组织, 这种调控可以实现材料显微组织的细化, 增加合金的强度、硬度, 提升其抗疲劳性, 同时保持足够的韧性以应对复杂的工

收稿日期: 2024-03-08; 修订日期: 2024-06-19

基金项目: 广西电网公司科技项目资助项目(GXKJXM20220064)

作者简介: 朱登杰(1987-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: zhudj@csg.cn

作环境。文献 [8] ~ 文献 [10] 通过开展铝合金不同锻造工艺参数的试验和锻造试块性能分析,发现随着锻造温度的降低,材料热加工塑性降低,易产生锻造裂纹。文献 [11] 和文献 [12] 采用原位自生法制备了  $\text{TiB}_2/\text{Al}$  合金,经过相关后续热处理,复合材料的抗拉强度、屈服强度和弹性模量均提高超过 20%。

固溶处理、时效处理及锻造工艺参数等生产过程的重要工艺参数可影响材料的微观组织和控制轧件表面缺陷<sup>[13-14]</sup>,进而提高产品的力学性能,然而生产过程中这些重要工艺参数对材料力学性能的影响程度尚未可知。本文以输电线路连接金具 PD 挂板为例,选用一种  $\text{TiB}_2$  颗粒增强铝合金材料进行试制,并选取了生产过程中的打击能量、固溶温度和时效温度 3 个重要工艺参数开展正交试验<sup>[15]</sup>,研究各工艺参数对  $\text{TiB}_2$  颗粒增强铝合金挂板力学性能的影响程度,并通过试验确定最优工艺参数组合,得到抗拉强度高达 400 MPa 的高强度铝合金挂板,高于《中国南方电网公司输变电工程标准设计》<sup>[16]</sup>中对于铝合金连接金具抗拉强度应大于 375 MPa 的要求。随后根据正交试验结果,开展补充试验,进行固溶温度和时效温度对高强度铝合金挂板力学性能影响规律的研究。

### 1 高强度铝合金挂板正交试验

由于 6082 铝合金材料具有良好的热加工性能和良好的耐腐蚀性能<sup>[17]</sup>,以 6082 铝合金作为基体合金,采用原位自生技术制备  $\text{TiB}_2$  颗粒增强 6082 铝合金材料。将 6082 铝合金于熔炉中熔化并加热至 700 ℃,然后在熔体中加入配比好的  $\text{KBF}_4$  和  $\text{K}_2\text{TiF}_6$ ,并进行搅拌,使混合盐和熔体充分反应生成  $\text{TiB}_2$ ,待铝合金熔体中反应结束后,除去不必要的副产物后浇铸即可获得  $\text{TiB}_2$  颗粒增强 6082 铝合金材料。将熔炼之后得到的铝合金铸棒挤压加工成  $\Phi 33\text{ mm}\times 110\text{ mm}$  的圆棒。其中  $\text{TiB}_2$  颗粒增强 6082 铝合金的化学成分如表 1 所示。

表 1  $\text{TiB}_2$  颗粒增强 6082 铝合金的化学成分 (%, 质量分数)  
Table 1 Chemical compositions of  $\text{TiB}_2$  particle reinforced 6082 aluminum alloy (%, mass fraction)

Si	Fe	Ti	B	Cu	Mg	Al
0.949	0.153	0.790	0.576	0.564	0.725	余量

PD 挂板的加工工艺流程为:制坯→通过网带

炉加热坯料→固态模锻成形→固溶处理→时效处理→检测;其工艺路线图如图 1 所示。对固态模锻后的挂板开展固溶处理能够使合金中各种相充分溶解,形成过饱和固溶体,为后续的时效处理提供基础。通过时效处理使过饱和固溶体中的合金元素形成细小且均匀分布的析出相颗粒,从而提高合金的强度。

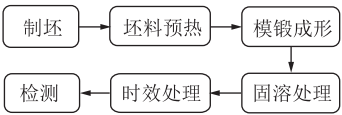


图 1 高强度铝合金挂板的加工工艺路线图  
Fig. 1 Processing process roadmap for high-strength aluminum alloy

制备过程中,采用网带炉加热坯料至指定温度,采用热铁棒加热模具至指定温度,采用 J58K-630 型数控电动螺旋压力机对坯料进行锻造,采用立式铝合金淬火炉和时效炉进行固溶处理和时效处理,产品主要指标为抗拉强度和拉断力。PD 挂板产品示意图如图 2 所示,标准拉伸试样如图 3 所示。

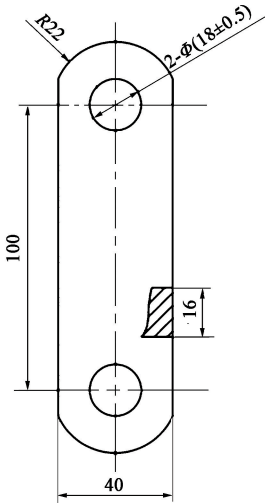


图 2 PD 挂板产品尺寸图  
Fig. 2 Dimension diagram of PD panel product

为研究不同制备工艺和热处理方法下,颗粒增强铝合金 PD 挂板的力学性能,确定合理的工艺流程及关键工艺参数,采用正交试验方法来优化设计模锻工艺参数和热处理温度,试验采用  $L_9(3^3)$  的正交表,选择打击能量、固溶温度和时效温度作为正交试验因素,并根据现场生产经验确定正交试验参数范围:打击能量的范围为 20~30 kJ,固溶温度的范围为 525~545 ℃,时效温度的范围为 165~185 ℃。固溶温度加载曲线和时效温度加载曲线如

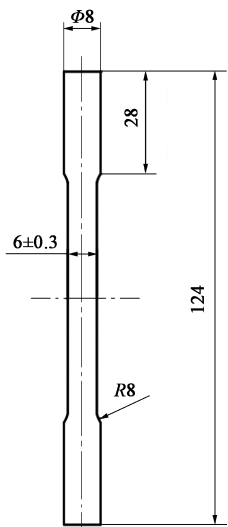


图 3 拉伸试样尺寸示意图  
Fig. 3 Dimension diagram of tensile specimen

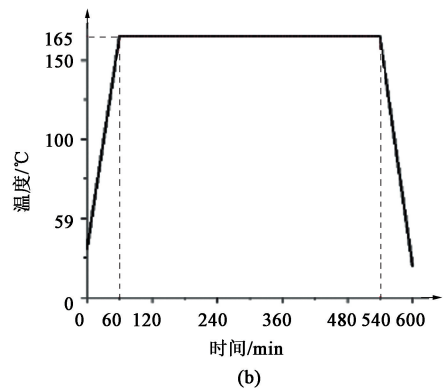
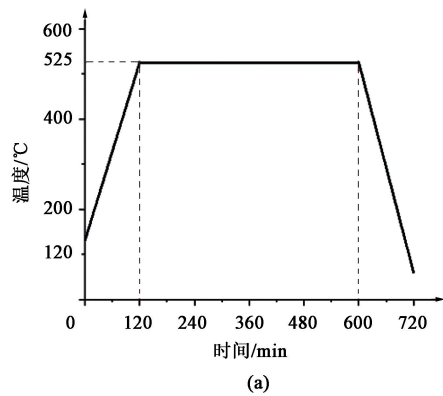


图 4 温度加载曲线  
(a) 固溶温度 (b) 时效温度  
Fig. 4 Temperature loading curves  
(a) Solution temperature (b) Aging temperature

图 4 所示。将打击能量  $A$ 、固溶温度  $B$  和时效温度  $C$  3 个因素均划分为 3 个水平，共进行 9 组试验。正交试验参数设置如表 2 所示。压力机施加压力前状态和成品堆如图 5、图 6 所示。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

因素	水平 1	水平 2	水平 3
打击能量 $A/\text{kJ}$	20	25	30
固溶温度 $B/^{\circ}\text{C}$	525	535	545
时效温度 $C/^{\circ}\text{C}$	165	175	185



图 5 压力机施加压力前状态  
Fig. 5 State of press before applying pressure



图 6 成品堆  
Fig. 6 Finished reactor

## 2 正交试验结果分析

根据 GB/T 228.1—2021<sup>[18]</sup>，采用 E45.504 拉力试验机进行拉伸力学试验，拉伸速率为  $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。测试过程中工程应变率为  $1\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ，在室温条件下测试，温度约为  $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了保证试验结果的可

重复性和准确性，每组试验至少测 3 次。由于 GB/T 228.1—2021<sup>[18]</sup>对挂板的标称为破坏载荷，即不允许发生机械破坏的最大载荷，且由于加工工艺的原因，会导致标准拉伸试件尺寸存在 $\pm 0.03\text{ mm}$ 的误差，因此，本文选取两个强度指标进行分析，即抗拉强度和拉断力，试验结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果  
Table 3 Results of orthogonal test

编号	打击能量/ kJ	固溶温度/ ℃	时效温度/ ℃	拉断力/ kN	抗拉强度/ MPa
ZJ-1	30	525	165	19.05	381.33
ZJ-2	30	535	185	18.42	363.00
ZJ-3	30	545	175	17.82	341.33
ZJ-4	25	525	185	18.38	360.33
ZJ-5	25	535	175	20.13	391.33
ZJ-6	25	545	165	20.30	416.00
ZJ-7	20	525	175	18.80	367.00
ZJ-8	20	535	165	20.23	398.67
ZJ-9	20	545	185	18.52	377.33

对正交试验数据进行极差分析，拉断力极差分析结果如表 4 所示，抗拉强度极差分析结果如表 5 所示，其中， $K$  值和  $K_{\text{avg}}$  值分别为每因子水平下试验数据的加和值和平均值。

表 4 拉断力极差分析结果 (kN)

参数	水平	A	B	C
$K$ 值	1	56.75	54.17	58.81
	2	56.67	57.45	57.87
	3	56.70	58.50	53.44
$K_{\text{avg}}$ 值	1	18.92	18.06	19.60
	2	18.89	19.15	19.29
	3	18.90	19.50	17.81
最佳水平		1	2	1
R 值		0.03	1.09	1.79

通过表 4 数据可知，各参数对 PD 挂板拉断力的影响程度由大到小依次为：时效温度>固溶温度>打击能量。时效温度对拉断力的影响程度要远大于固溶温度，固溶温度对拉断力的影响程度要远大于打击能量，为了提高 PD 挂板的拉断力，应首先控制适宜的时效温度，随后调整固溶温度。而对于固态模锻的打击能量而言，相比于前两者其对拉断力

表 5 抗拉强度极差分析结果 (MPa)

Table 5 Range analysis results of tensile strength (MPa)

参数	水平	A	B	C
$K$ 值	1	1146.67	1102.00	1181.33
	2	1151.33	1161.33	1181.67
	3	1151.33	1186.00	1086.33
$K_{\text{avg}}$ 值	1	382.22	367.33	393.78
	2	383.78	387.11	393.89
	3	383.78	395.33	362.11
最佳水平		2 或 3	3	2
R 值		1.56	28.00	31.78

的影响水平较低，在实际生产之中通过调整打击能量提高拉断力的做法并不适宜。

通过表 5 数据可知，各参数对 PD 挂板抗拉强度的影响程度由大到小依次为：时效温度>固溶温度>打击能量。时效温度和固溶温度对抗拉强度的影响程度要远大于打击能量，为了提高 PD 挂板的抗拉强度，应对产品进行合适的固溶处理与时效处理。而对于固态模锻的打击能量而言，相比于前两者其对抗拉强度的影响水平较低，在实际生产之中通过调整打击能量提高抗拉强度的做法并不适宜。

将试验数据进行整理，如图 7 和图 8 所示。由表 3 和图 7、图 8 数据可知，第 6 组的 PD 挂板的抗拉强度及拉断力均为最高，抗拉强度达到了 416.00 MPa，其强度相比于第 3 组提高了 22%，拉断力达到 20.3 kN，其拉断力相比于第 3 组提高了 14%。由此可知，生产过程中的打击能量、固溶温度和时效温度对 PD 挂板的拉断力和抗拉强度的影响较为显著。时效温度低于 175 ℃的试验组得到的抗拉强度和拉断力普遍大于时效温度高于 175 ℃的抗拉强度和拉断力。

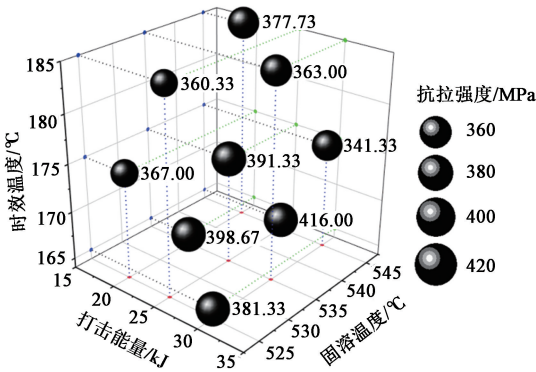


图 7 正交试验抗拉强度分析图

Fig. 7 Analysis diagram of tensile strength for orthogonal test



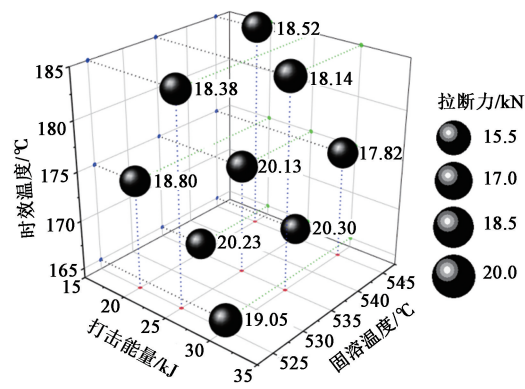


图 8 正交试验拉断力分析图  
Fig. 8 Analysis diagram of tensile breaking force for orthogonal test

3 热处理影响规律研究

为验证正交试验结果及进一步探究固溶温度和时效温度对拉断力及抗拉强度的影响规律，继续开展了补充试验。通过控制变量法，设置不同组别的时效温度和打击能量，在同一组中只变化固溶温度，测量试验中各组的 PD 挂板的拉断力和抗拉强度，结果如表 6 所示。

表 6 固溶温度试验结果

Table 6 Experimental results of solution temperature

编号	打击能量/ kJ	固溶温度/ ℃	时效温度/ ℃	拉断力/ kN	抗拉强度/ MPa
GR-1-1	25	525	165	17.72	364
GR-1-2	25	535	165	20.60	402
GR-1-3	25	545	165	20.42	413
GR-2-1	25	525	175	18.13	369
GR-2-2	25	535	175	19.98	393
GR-2-3	25	545	175	19.81	403
GR-3-1	20	525	175	18.72	367
GR-3-2	20	535	175	19.88	391
GR-3-3	20	545	175	19.69	397
GR-4-1	30	525	185	15.96	341
GR-4-2	30	535	185	18.49	365
GR-4-3	30	545	185	19.25	383
GR-5-1	20	525	165	18.99	384
GR-5-2	20	535	165	20.19	398
GR-5-3	20	545	165	20.65	407

通过控制变量法，设置不同组别的固溶温度和打击能量，在同一组中只变化时效温度，测量试验中各组的 PD 挂板的拉断力和抗拉强度，结果如表 7 所示。

表 7 时效温度试验结果

Table 7 Experimental results of aging temperature

编号	打击能量/ kJ	固溶温度/ ℃	时效温度/ ℃	拉断力/ kN	抗拉强度/ MPa
SX-1-1	30	525	165	19.18	383
SX-1-2	30	525	175	18.16	367
SX-1-3	30	525	185	15.96	341
SX-2-1	30	545	165	21.16	411
SX-2-2	30	545	175	18.28	366
SX-2-3	30	545	185	17.12	341
SX-3-1	25	535	165	19.98	402
SX-3-2	25	535	175	18.09	388
SX-3-3	25	535	185	15.96	361
SX-4-1	25	545	165	20.3	398
SX-4-2	25	545	175	19.94	392
SX-4-3	25	545	185	19.46	363
SX-5-1	20	525	165	19.03	385
SX-5-2	20	525	175	18.85	366
SX-5-3	20	525	185	17.97	359

整理固溶温度试验数据，得到 PD 挂板力学性能与固溶温度的关系曲线，如图 9 所示。

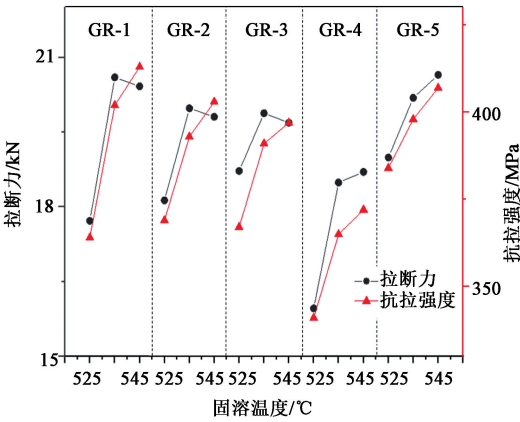


图 9 拉断力、抗拉强度与固溶温度关系曲线

Fig. 9 Relation curves of tensile breaking force and tensile strength with solution temperature

根据表 6 和图 9 可知：当固溶温度由 525 ℃增加至 535 ℃时，PD 挂板拉断力及抗拉强度均有大幅度提高；但当固溶温度由 535 ℃增加至 545 ℃时，PD 挂板抗拉强度有所提高，但增加幅度要小于由 525 ℃增加到 535 ℃时的增加增幅，5 组 PD 挂板拉断力的变化趋势不定，但变化幅度远小于前一阶段增幅。总之，在试验温度范围内，随着固溶温度的提高，PD 挂板抗拉强度大幅增大，拉断力先显著提高

后变化不明显。另外, 还可以发现, GR-5 组中当固溶温度达到 545 ℃ 时, 拉断力和抗拉强度同时达到最大, 此时打击能量为 20 kJ, 时效温度为 165 ℃。

将时效温度试验数据整理, 得到 PD 挂板力学性能与时效温度的关系曲线, 如图 10 所示。

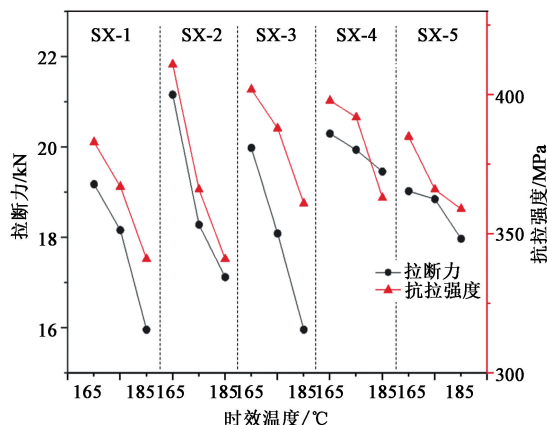


图 10 拉断力、抗拉强度与时效温度关系曲线

Fig. 10 Relation curves of tensile breaking force and tensile strength with aging temperature

根据表 7 和图 10 可知, 当时效温度由 165 ℃ 增加至 185 ℃ 时, PD 挂板的拉断力及抗拉强度均有所下降。另外, 还可以发现, SX-2 组中当时效温度达到 165 ℃ 时, 拉断力和抗拉强度同时达到最大, 此时打击能量为 30 kJ, 固溶温度为 545 ℃。

GR-5-2 组的工程应力-工程应变曲线如图 11 所示, 由图 11 可知, 抗拉强度达到了 398 MPa, 屈服强度达到了 388 MPa, 断后伸长率为 14.75%, 强度相比于 6082-T6 铝合金提高 20%。

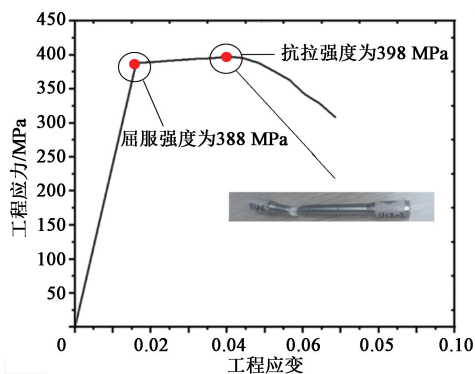


图 11 工程应力-工程应变曲线

Fig. 11 Engineering stress-engineering strain curve

## 4 结论

(1) 固溶温度和时效温度对拉断力及抗拉强度

的影响较大, 打击能量对拉断力及抗拉强度的影响不显著。

(2) 对于拉断力的最佳参数组合为: 打击能量为 20 kJ、固溶温度为 535 ℃、时效温度为 165 ℃。对于抗拉强度的最佳参数组合为: 打击能量为 25 kJ、固溶温度为 545 ℃、时效温度为 175 ℃。

(3) 随着固溶温度的提高, 高强度铝合金挂板抗拉强度大幅增大, 拉断力先显著提高后变化不明显。随着时效温度的提高, 高强度铝合金挂板的拉断力及抗拉强度均有所下降。

## 参考文献:

- [1] 商利, 李新梅, 路国闯, 等. 特高压输电线路磁场对电力金具材料摩擦磨损的影响 [J]. 表面技术, 2024, 53 (3): 132-141, 209.  
Shang L, Li X M, Lu G C, et al. Influence of magnetic field on friction and wear of metal tools in UHV transmission lines [J]. Surface Technology, 2024, 53 (3): 132-141, 209.
- [2] 林一峰, 王增平, 王彤, 等. 构建更加坚强电网安全“第一道防线”的探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (16): 170-178.  
Lin Y F, Wang Z P, Wang T, et al. Discussion on building a stronger first line of defense for grid security [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (16): 170-178.
- [3] 陆旭, 罗汉武, 李文震, 等. 电力金具图像故障状态评估 [J]. 红外技术, 2020, 42 (7): 632-636.  
Lu X, Luo H W, Li W Z, et al. Estate evaluation of image fault of electric power fittings [J]. Infrared Technology, 2020, 42 (7): 632-636.
- [4] 白星良. 热处理对 6016 铝合金组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2023, 48 (12): 123-128.  
Bai X L. Effect of heat treatment on microstructure and properties of 6016 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48 (12): 123-128.
- [5] 邹朝江, 郑腾腾, 张正, 等. 固溶前预热对 Ti6Al4V 合金厚截面环锻件组织均匀性的影响 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (9): 213-219.  
Zou C J, Zheng T T, Zhang Z, et al. Influence of preheating before solution on microstructure uniformity for Ti6Al4V alloy ring forgings with thick cross-section. [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (9): 213-219.
- [6] Wei P, Chen Z, Zhang S Z, et al. Effect of T6 heat treatment on the surface tribological and corrosion properties of AlSi10Mg samples produced by selective laser melting [J]. Materials Characterization, 2020, 171: 110769.
- [7] Majeed A, Zhang Y, Lyu J, et al. Investigation of T4 and T6 heat treatment influences on relative density and porosity of AlSi10Mg alloy components manufactured by SLM [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 139 (1): 106191-106194.

(下转第 51 页)